MOSFET

Dankzij hun uitzonderlijk lage AAN-weerstand zijn MOSFET's ideale onderdelen voor het schakelen van grote stromen. In dit artikel treft u een uitgebreide kennismaking met dit interessant onderdeel aan.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 24-02-2020

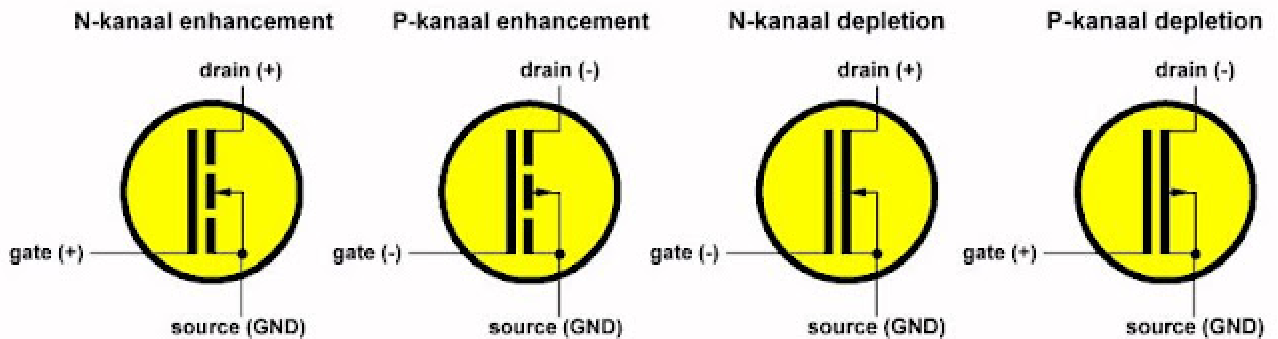
Kennismaking met de MOSFET

De geschiedenis
De MOSFET begint zijn bestaan als IGFET, letterwoord voor *'**I**nsulated **G**ate **F**ield **E**ffect **T**ransistor'*. Zoals deze naam doet vermoeden is de belangrijkste eigenschap van dit onderdeel dat de ***gate elektrisch volledig geïsoleerd is*** van de rest van de halfgeleider. De mate van geleiding van een MOSFET wordt dus uitsluitend capacitief beïnvloed door de spanning op de gate!
Dit principe werd voor het eerst geopperd door de naar Amerika geëmigreerde Oekraïense wetenschapper J. Lilienfeld die er in 1925 een patent op aanvroeg. Het duurde tot de jaren zeventig van de vorige eeuw alvorens men in staat was het principe tot een werkende halfgeleider om te zetten. Vanwege de toegepaste technologie werd de naam van IGFET veranderd in MOSFET, letterwoord van *'**M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor'*.

Vier verschillende typen
In de loop der jaren zijn door de diverse halfgeleider fabrikanten heel veel technologisch van elkaar verschillende MOSFET's ontwikkeld die ieder met een iets andere naam op de markt werden gezet. Daar gaat deze paragraaf echter niet over. Waar het wél over gaat is de polariteit van de spanningen die u op het onderdeel moet aansluiten en de spanningen waarbij de MOSFET naar geleiding of sper wordt gestuurd. In de onderstaande figuur hebben wij deze vier schakeltechnisch verschillende soorten overzichtelijk samengevat.

- **Enhancement mode MOSFET's**
  Deze MOSFET's worden in het Nederlands *'verrijkingstypen'* genoemd. Deze halfgeleiders zijn, zonder sturing op de gate, open schakelaars. Zij geleiden dus geen stroom. U kunt deze onderdelen vergelijken met een NO-schakelaar (Normally Open).
- **Depletion mode MOSFET's**
  Deze onderdelen worden in het Nederlands *'verarmingstypen'* genoemd. Deze MOSFET's geleiden als er geen spanning op de gate aanwezig is. U kunt deze onderdelen dus vergelijken met een NC-schakelaar (Normally Closed).
- **N-kanaal MOSFET's**
  Bij deze onderdelen moet u de drain (de bovenste aansluiting) positief maken ten opzichte van de source (de onderste aansluiting).
- **P-kanaal MOSFET's**
  Bij deze onderdelen moet u de drain negatief maken ten opzichte van de source.

Uit de onderstaande figuur kunt u ook afleiden welke polariteiten u aan de gate moet aanleggen bij normaal gebruik van de MOSFET.

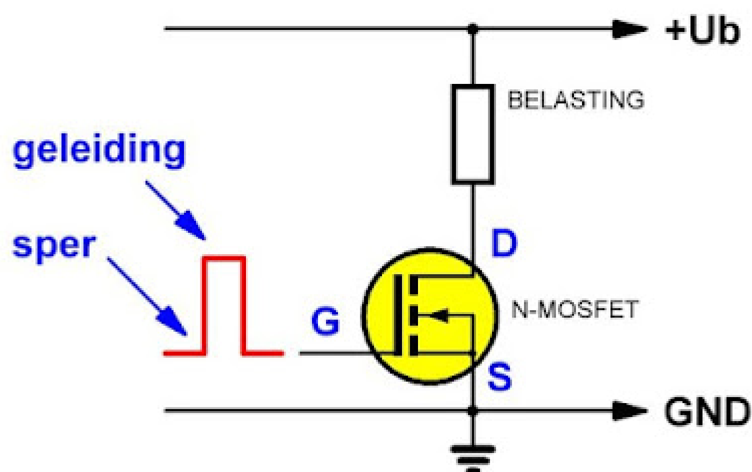


De symbolen en polariteiten van de vier beschikbare soorten MOSFET's. (© 2020 Jos Verstraten)

Let op!
De richting van de pijltjes in de symbolen is nogal contra-intuïtief! Als u deze richting vergelijkt met deze bij normale bipolaire transistoren lijkt het alsof de pijltjes bij MOSFET's verkeerd staan. Deze staan immers tegengesteld aan de normale conventionele stroomrichting van positief naar negatief. Om nogal theoretische redenen heeft men ervoor gekozen om de pijltjes te tekenen in de richting van de elektronenstroom. Uit dit gegeven kunt u de namen van de aansluitingen verklaren. De source is de elektrode die de *bron* is van de elektronen en deze aan de MOSFET levert. De drain is de elektrode die de elektronen die de MOSFET levert weer afvoert.

Opmerking
In de moderne laboratorium praktijk zult u hoofdzakelijk te maken krijgen met N-kanaal enhancement mode MOSFET's. Deze zijn blijkbaar het goedkoopst te maken en hebben superieure eigenschappen. De standaard schakeling met een dergelijke MOSFET is:

- Source aan de massa.
- Drain via de belasting naar de positieve voeding.
- Gate aan de massa voor sperrende MOSFET.
- Gate positief voor geleidende MOSFET.



Standaard schakeling rond een N-kanaal enhancement mode MOSFET. (© 2020 Jos Verstraten)

Toepassing van MOSFET's
MOSFET's worden voornamelijk in de vermogenselektronica toegepast. Dit heeft te maken met het feit dat het meerderheidsladingdragers zijn, waardoor zij zeer snel kunnen schakelen van geleiden naar sperren. Bovendien hebben zij een zeer hoge ingangsimpedantie en een zeer lage inwendige weerstand $R_{DS(ON)}$ bij volle geleiding. Zij hebben geen last van thermische lawine-effecten, zodat zij zelfs onder de zwaarste externe condities zeer stabiel blijven werken.

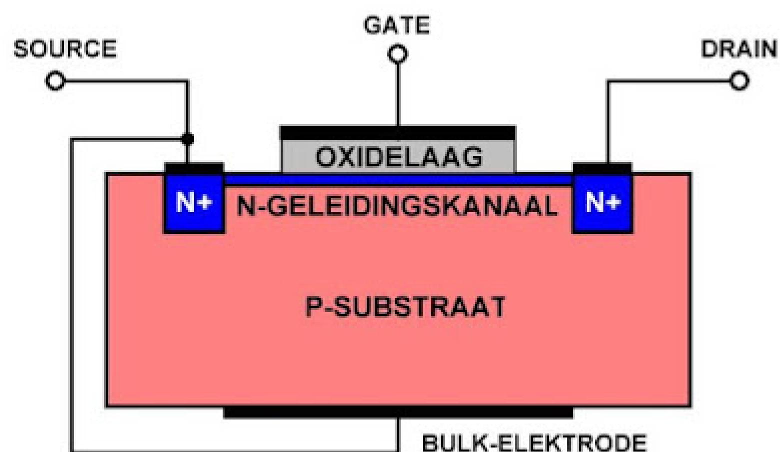
MOSFET's contra BJT's bij zware belastingen
Als u een zware DC-belasting van 50 A moet schakelen gebruikte u daar vroeger een BJT

*(**B**ipolaire **J**unctie **T**ransistor)* zoals een BUT30V voor. Zelfs bij maximale verzadiging van zo'n halfgeleider blijft er tóch een spanning van 0,5 V tussen de collector en de emitter staan. In de halfgeleider wordt dan een thermisch vermogen van niet minder dan
$P = U \bullet I = 0{,}5 \bullet 50 = 25$ W
gedissipeerd dat u met een enorme koelplaat moet afvoeren. Bovendien kost zo'n transistor ongeveer € 25,00.
Dezelfde stroom kunt u schakelen met een MOSFET van het type IRLB3034PBF, die € 3,80 kost. De $R_{DS(ON)}$ van deze MOSFET bedraagt slechts 0,0017 Ω. Het thermisch vermogen dat in deze halfgeleider wordt gedissipeerd is gelijk aan:
$P = I^2 \bullet R = 50 \bullet 50 \bullet 0{,}0017 = 4{,}25$ W
Verder commentaar overbodig!

De samenstelling van een MOSFET

Inleiding
Een MOSFET is opgebouwd uit lagen in de volgorde M-O-S *(**M**etaal-**O**xide-**S**emiconductor)*. De metaallaag vormt de gate-aansluiting die via de oxidelaag volledig elektrisch gescheiden is van de rest van de halfgeleider. De source- en drain-aansluitingen zijn verbonden met zeer sterk gedoteerde gebieden in het substraat van de halfgeleider. Er is meestal ook een contact dat verbonden is met het substraat (bulk-elektrode), maar vaak wordt dit intern verbonden met de source.
Door het aanbrengen van een spanning op de gate verandert de concentratie van ladingdragers in de halfgeleider, waardoor de weerstand tussen de source en drain varieert. Door de aanwezigheid van de isolerende oxidelaag tussen de gate en de halfgeleider vloeit er geen gelijkstroom door de gate.

De N-kanaal depletion mode MOSFET
In de onderstaande figuur is geschetst hoe een dergelijke halfgeleider is samengesteld. De MOSFET is opgebouwd is uit een P-substraat waar twee eilandjes met sterk gedoteerd N-materiaal (N+) zijn aangebracht zijn. De source-elektrode is verbonden met het ene eilandje, de drain-elektrode met het andere. Tussen de twee eilandjes is een geleidend kanaal (blauw getekend) uit N-materiaal aangebracht. Boven dit N-kanaal is een isolerend laagje uit SiO_2 (siliciumdioxide) opgedampt. Boven op dit oxidelaagje is de gate-elektrode gemonteerd. De source is intern verbonden met de bulk-elektrode. Deze is aangebracht aan de onderzijde van het P-substraat.



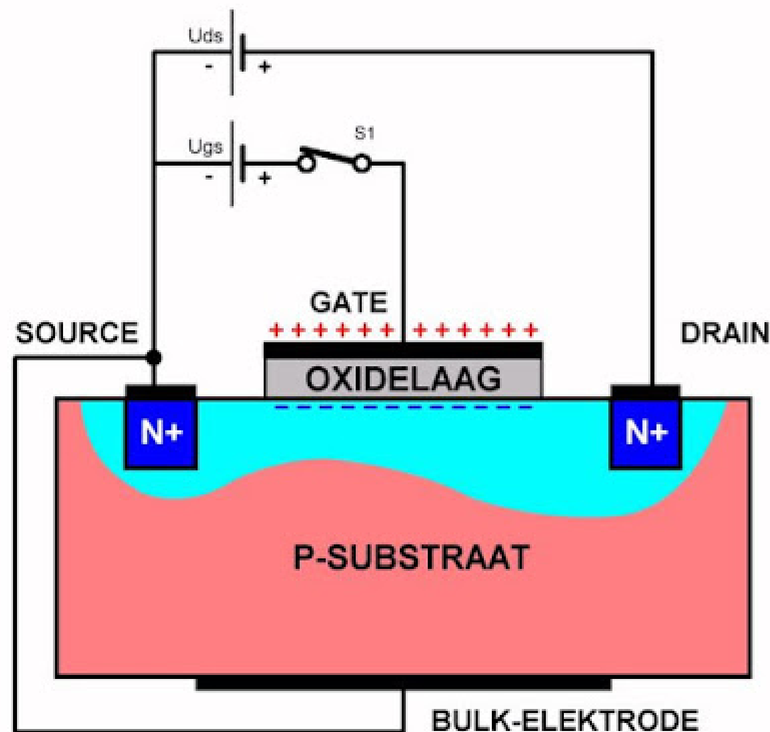
De samenstelling van een N-kanaal depletion mode MOSFET.
(© 2020 Jos Verstraten)

Als u op de gate geen spanning aanlegt ontstaat een geleidend kanaal tussen de drain en de source via het N-geleidingskanaal. De MOSFET is gesloten, er vloeit stroom van de drain naar de source. Als u op de gate een negatieve spanning aanlegt zal er een elektrisch veld

ontstaan tussen de gate en het substraat. Dit veld zorgt ervoor dat de geleiding van het N-geleidingskanaal lager wordt en de stroom tussen drain en source afneemt. Bij een bepaalde waarde van de negatieve spanning op de gate wordt het geleidingskanaal volledig dicht gedrukt en spert de MOSFET.

De P-kanaal depletion mode MOSFET
Als u in de bovenstaande uitleg alle N-gebieden vervangt door P-gebieden en vice versa en alle spanningen inverteert hebt u de werking van een P-kanaal depletion mode MOSFET onder de knie.

De N-kanaal enhancement mode MOSFET
De opbouw van een dergelijke MOSFET lijkt erg op deze van zijn depletion mode soortgenoot. Het enige verschil is dat het N-geleidingskanaal ontbreekt, zie de onderstaande figuur. Als u geen spanning op de gate aanbrengt zal er tussen de drain en de source nooit stroom kunnen lopen. Er staan immers een N/P- en een P/N-overgang is serie. Anders wordt het als u de schakelaar S1 sluit en de gate aansluit op een positieve spanning ten opzichte van de source. Er ontstaat een elektrisch veld tussen de gate en het substraat met als gevolg dat er in het substraat een zone ontstaat die men het *'geïnverteerd kanaal'* noemt. Het P-substraat gaat zich lokaal onder de gate als N-gebied gedragen. Tussen de drain en de source ontstaat nu een N/N/N-overgang en er kan stroom lopen tussen de drain en de source.

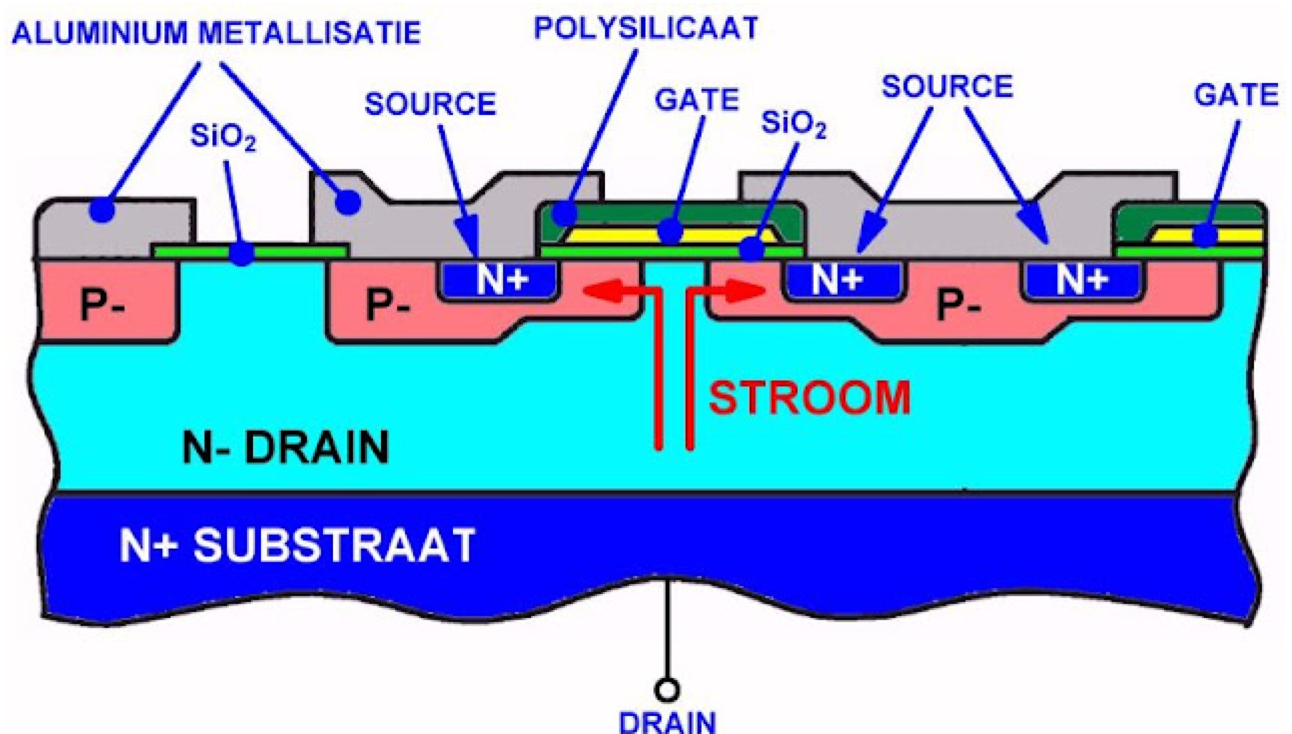


De samenstelling van een N-kanaal enhancement mode MOSFET.
(© 2020 Jos Verstraten)

De P-kanaal enhancement mode MOSFET
Ook nu geldt dat de werking duidelijk wordt als u in de bovenstaande figuur alle P's door N's vervangt, alle N's door P's en de polariteit van de spanningen inverteert.

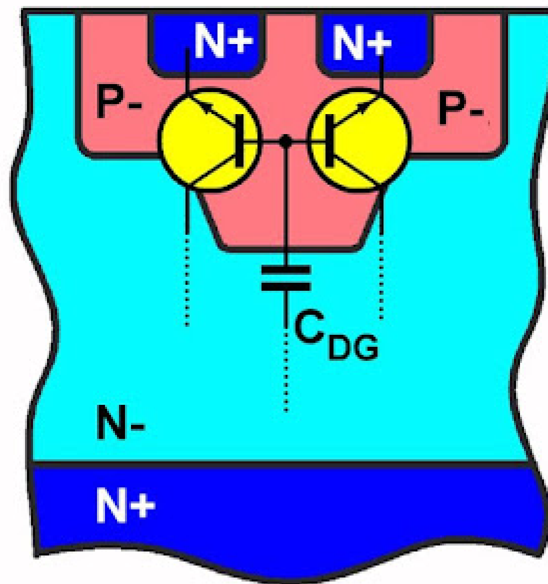
De samenstelling van moderne D-MOSFET's
De in de twee vorige figuren getekende MOSFET's werken weliswaar als dusdanig, maar hebben als belangrijkste nadeel dat de weerstand tussen de drain en de source toch vrij groot is, zelfs bij maximale geleiding van de halfgeleider. Alle fabrikanten van dergelijke onderdelen hebben hun research gericht op het verlagen van deze weerstand, die $R_{DS(ON)}$ wordt genoemd. Tegenwoordig is men in staat MOSFET's te fabriceren met een $R_{DS(ON)}$ van slechts een paar mΩ. Het gaat te ver om alle constructies te bespreken die men heeft bedacht om

deze weerstand te verlagen. In de onderstaande figuur is de samenstelling getekend van een moderne D-MOSFET, de door diverse fabrikanten op de markt wordt gebracht.
De source is nu cirkelvormig uitgevoerd met in het midden een uitsparing voor de gate. De drain is als een compacte massa halfgeleidermateriaal aan de onderzijde van de constructie aanwezig. Als de spanning op de gate het kanaal opent vloeit de elektronenstroom van drain naar source onder de gate door.
In eerste lijkt dit geen verbetering op te leveren, maar het is constructief gezien geen enkel probleem om duizenden van dergelijke source/gate-eilandjes in het halfgeleidermateriaal te implanteren. Deze worden parallel geschakeld, waardoor er duizenden kanaaltjes worden geopend en er duizenden stroompjes van drain naar de duizenden sources gaan vloeien. Het gevolg is dat de AAN-weerstand $R_{DS(ON)}$ van het onderdeel dramatisch daalt.
Er zijn nogal wat geometrieën mogelijk, zoals ronde, vierkante, driehoekvormige en veelhoekvormige sources. Al die geometrieën hebben hun eigen voor- en nadelen. In het algemeen kunt u echter stellen dat alle moderne MOSFET's met spanningen tot 300 V volgens de in de onderstaande figuur voorgestelde basisgeometrie zijn gemaakt.
De D-MOSFET structuur is uiterst geschikt voor de fabricage van groot vermogen MOSFET's. Deze technologie wordt onder diverse namen op de markt gebracht, zoals VMOS, HEXFET en SIPMOS.



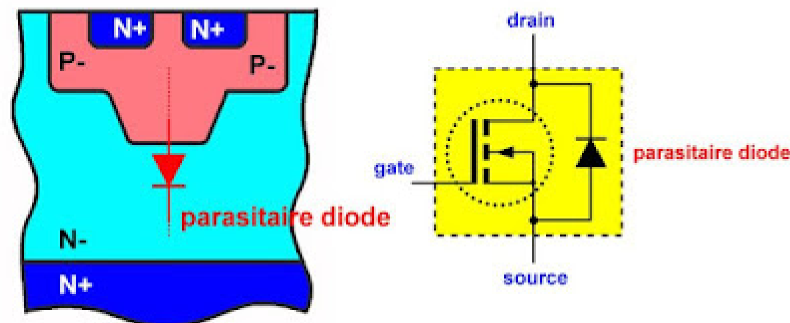
De samenstelling van een D-MOSFET. (© 2020 Jos Verstraten)

Parasitaire diode
De allereerste versies van MOSFET's waren nogal gevoelig voor spanningsdoorslag als gevolg van spanningstransiënten. Bovendien wilden deze onderdelen wel eens gaan geleiden als de spanning tussen drain en source te snel steeg, het ook van thyristoren bekende ΔV/Δt-verschijnsel. Dit verschijnsel kan worden verklaard door de aanwezigheid van een parasitaire NPN-transistor als gevolg van de constructie. Dit is voorgesteld in de onderstaande figuur. De stroom die noodzakelijk is om de capaciteit tussen drain en gate op te laden vloeit ook in de basis van deze parasitaire transistor en veroorzaakt de ongewenste geleiding.



De aanwezigheid van een inherente NPN-transistor.
(© 2020 Jos Verstraten)

Dit verschijnsel kan worden voorkomen door de N+ bron kort te sluiten met de P+ basis door het toepassen van metallisatie van de source. Het gevolg hiervan is echter dat er een parasitaire diode ontstaat die anti-parallel staat aan de MOSFET, zie de onderstaande figuur. Deze diode heeft vooral op HF-gebied funeste gevolgen op de specificaties van de MOSFET. Vandaar dat u bij HF-toepassingen vaak een externe zeer snelle diode parallel over de MOSFET zult aantreffen, die de slechte eigenschappen van de interne parasitaire diode compenseert.



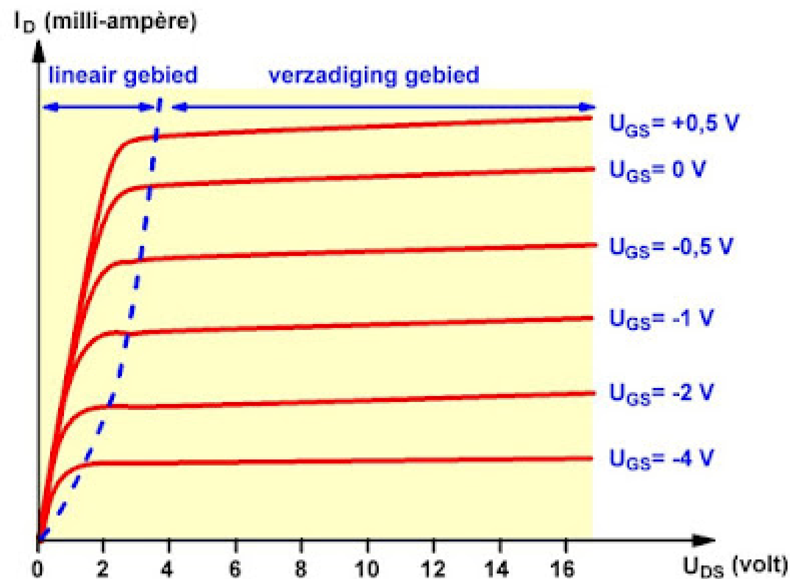
De interne parasitaire diode in de constructie van de MOSFET.
(© 2020 Jos Verstraten)

De uitgangskarakteristiek van een MOSFET

Inleiding
De uitgangskarakteristiek $I_D = f(U_{DS})$ geeft het verband tussen de stroom I_D die door de MOSFET vloeit en de spanning U_{DS} die tussen de drain en de source staat. Deze karakteristiek is uiteraard afhankelijk van de spanning U_{GS} die u tussen de gate en de source aanlegt. Door deze spanning op verschillende waarden in te stellen en voor iedere waarde het verband tussen I_D en U_{DS} op te meten ontstaat een bundel lijnen, die de volledige uitgangskarakteristiek van een MOSFET definiëren. Deze bundel vertoont veel gelijkenis met de uitgangskarakteristiek van een oeroude penthode buis.

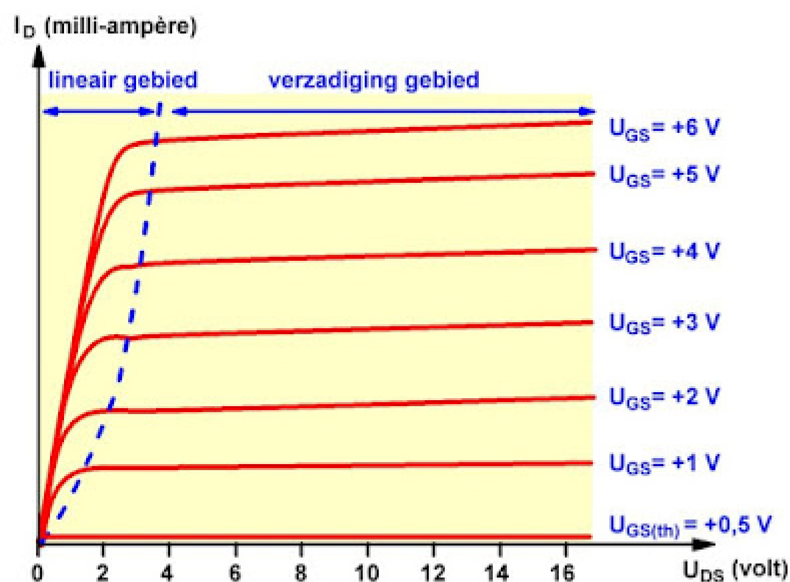
De uitgangskarakteristiek van een N-kanaal depletion mode MOSFET
In de onderstaande figuur is deze grafiek getekend. De spanning V_{DS} verloopt positief en aan de gate legt u een negatieve spanning ten opzichte van de source aan. Bij een bepaalde

waarde van die negatieve spanning zal er helemaal geen stroom door de MOSFET vloeien. Als u de spanning minder negatief maakt zult u merken dat de stroom door de halfgeleider toeneemt om een maximale waarde te bereiken als de spanning op de gate 0 V bedraagt.



De uitgangskarakteristiek van een N-kanaal depletion mode MOSFET.
(© 2020 Jos Verstraten)

De uitgangskarakteristiek van een N-kanaal enhanced mode MOSFET
Op een identieke manier kunt u de $I_D = f(U_{DS})$ karakteristiek van een N-kanaal enhanced mode MOSFET opstellen. Deze grafiekenbundel is in de onderstaande figuur voorgesteld. Het grote verschil is dat u nu een positieve spanning op de gate moet aanleggen om de halfgeleider in geleiding te sturen. Om zo'n MOSFET is geleiding te sturen moeten U_{GS} en U_{DS} dus beide positief zijn.



De uitgangskarakteristiek van een N-kanaal enhanced mode MOSFET.
(© 2020 Jos Verstraten)

Lineair en verzadigd gebied
In de getekende uitgangskarakteristieken kunt u twee duidelijk te onderscheiden werkingsgebieden ontdekken:

- **Lineair gebied**
  In dit gebied is de spanning over het interne kanaal nog niet groot genoeg om de meerderheidsladingdragers hun maximale driftsnelheid te geven. De statische

weerstand $R_{DS(ON)}$ is vrij constant en wordt gedefinieerd door de verhouding tussen de drain/source-spanning en de drainstroom. In dit gebied kunt u een MOSFET dus als lineaire versterker toepassen, waarbij de drainstroom afhankelijk is van de spanning tussen gate en source.

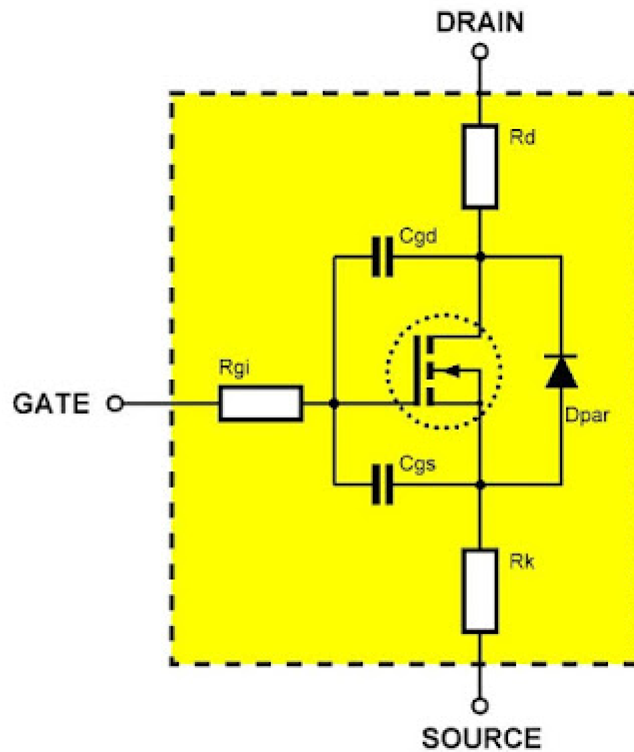
- **Verzadiging gebied**
  In dit gebied, ook saturated genoemd, is de spanning over het interne kanaal zo groot dat de meerderheidsladingdragers mat maximale driftsnelheid door het kristal vloeien. De drainstroom blijft dus constant op de maximale waarde. In dit gebied gedraagt de MOSFET zich dus als een constante stroombron. Opgemerkt moet worden dat de stroom die door de MOSFET vloeit in dit gebied afhankelijk is van de grootte van de spanning tussen gate en source.

De threshold spanning bij enhanced mode MOSFET's
De threshold spanning $U_{GS(th)}$ is de minimale spanning tussen gate en source waarbij drainstroom begint te vloeien. Deze spanningsdrempel kan gemakkelijk worden afgeleid uit de onderste lijn uit de grafiekenbundel in de uitgangskarakteristiek. U ziet in deze grafiek dat de threshold spanning afhankelijk is van het type en tussen +0,5 V en +4,0 V ligt. Deze $V_{GS(th)}$ heeft een negatieve temperatuurscoëfficiënt van ongeveer -7 mV/°C.

Specificaties van MOSFET's

Opmerking vooraf
Omdat u in de praktijk voornamelijk met N-kanaal enhanced mode MOSFET's zult werken zijn de besproken specificaties van toepassing op dit type MOSFET.

Het equivalent schema van een N-kanaal enhanced mode MOSFET
In de onderstaande figuur is het equivalent schema van een N-kanaal enhanced mode MOSFET voorgesteld. Het schema bestaat uit een ideale MOSFET, de parasitaire diode, de weerstanden van de halfgeleiderlagen, de aansluitdraden en -contacten en de capaciteiten tussen de drie aansluitingen.
De AAN-weerstand $R_{DS(ON)}$ is samengesteld uit de som van de weerstanden R_k en R_d. R_k is de kanaalweerstand van de halfgeleider, R_d de weerstand van de epitaxiaallaag. *Epitaxie* is een methode om een dunne monokristallijne laag aan te brengen op een monokristallijn substraat (de onderlaag). De aangebrachte laag wordt een epitaxiale laag genoemd. De kanaalweerstand R_k wordt hoofdzakelijk door de verontreinigingsstof concentratie (dotering) en de kanaalbreedte bepaald.
Bij MOSFET's die geschikt zijn voor U_{DS}-spanningen tot 100 V wordt de $R_{DS(ON)}$ hoofdzakelijk bepaald door R_k. Bij hoogspanning MOSFET's is het voornamelijk R_d die van invloed is op de AAN-weerstand. Het gevolg is dat deze laatste typen een $R_{DS(ON)}$ hebben die in het ohm-bereik ligt, terwijl de laagspanning typen een $R_{DS(ON)}$ hebben van soms slechts 0,03 Ω.

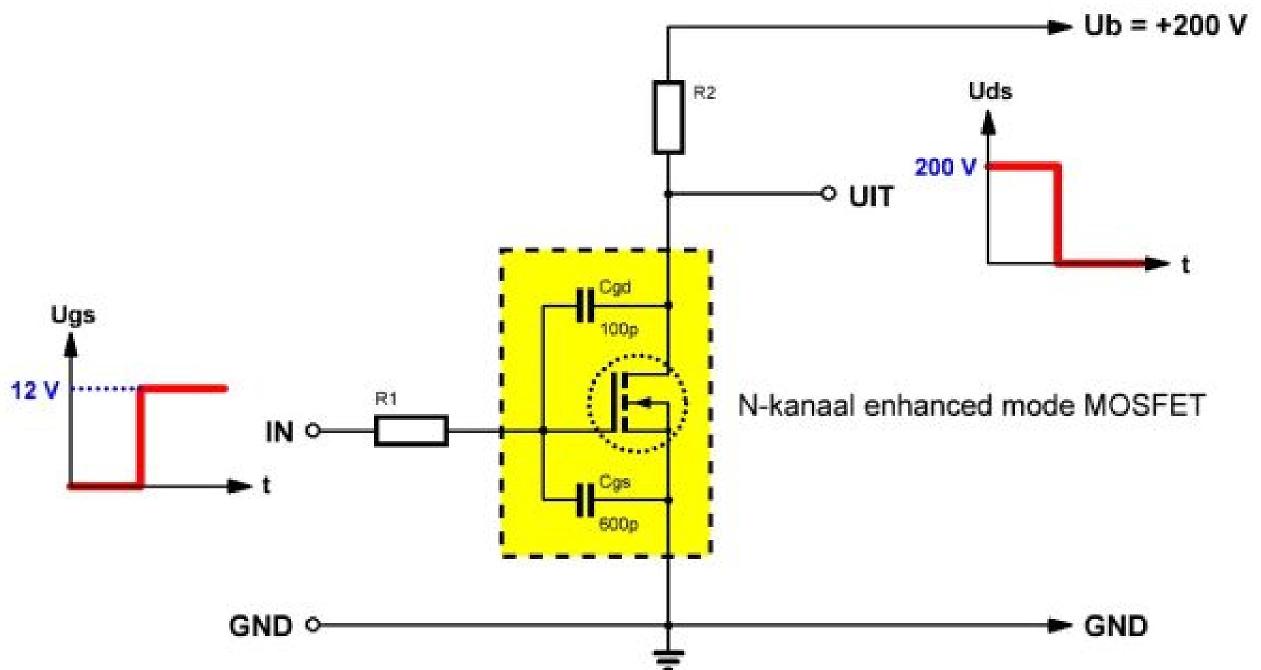


Equivalent schema van een N-kanaal enhanced mode MOSFET.
(© 2020 Jos Verstraten)

Het fabeltje van de stroomloze gatesturing
Er wordt beweerd dat u voor het in geleiding sturen van een N-kanaal enhanced mode MOSFET geen stroom nodig hebt, maar alleen een positieve spanning op de gate. De gate is immers galvanisch gescheiden van de rest van de halfgeleider door een dun laagje isolerend siliciumdioxide, dus hoe zou er stroom in deze aansluiting kunnen vloeien?
Het is zonder meer zo dat de statische gelijkstroom die in de gate vloeit inderdaad nul is. Maar bij het opeens aanleggen van een positieve spanningspuls aan de gate voor het van sper naar geleiding sturen van de MOSFET moet u de interne gate/source- en gate/drain-capaciteiten opladen en dat kost energie en vraagt dus stroom. Een en ander wordt verduidelijkt aan de hand van de onderstaande figuur. In dit voorbeeld gaan wij uit van de volgende waarden:

- C_{gs} = 600 pF
- C_{gd} = 100 pF
- Voedingsspanning = +200 V
- Ingangsssprong op de gate: van 0 V naar +12 V

Op het moment dat u de 12 V puls op de gate zet zal de ladingsverandering in de twee condensatoren gelijk zijn aan:
Q = C ● U = [600 pF ● 12 V] + [100 pF ● 200 V]
Q = 27,2 nC
Stel verder dat uw ingangspuls een stijgtijd heeft van 100 ns. Dan kunt u de ingangsstroom berekenen als:
I_{in} = Q / t
I_{in} = 27,2 nC / 100 ns
I_{in} = 272 mA
Deze stroom die u in de gate van de MOSFET moet sturen is vergelijkbaar met de stroom die u in de basis van een bipolaire transistor moet sturen! Er is echter één groot verschil. Om de bipolaire transistor in geleiding te houden moet u deze basisstroom constant aan de halfgeleider aanbieden. Bij een MOSFET vloeit deze stroom slechts gedurende 100 ns.

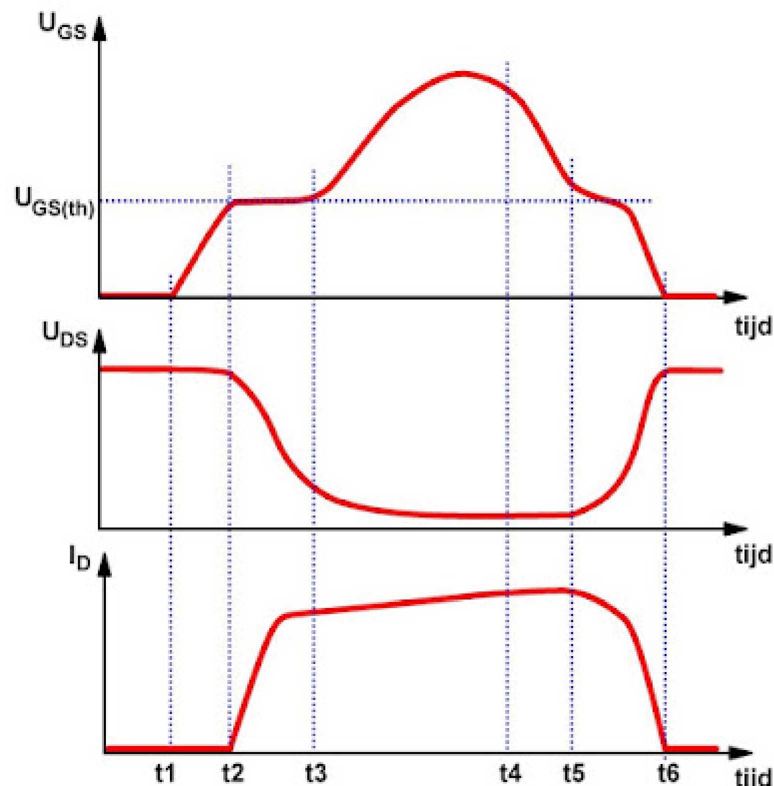


Het naar geleiding sturen van een N-kanaal enhanced mode MOSFET. (© 2020 Jos Verstraten)

Schakelen van een MOSFET
Zoals bij ieder actief onderdeel hangen de schakelkarakteristieken van een MOSFET af van de parasitaire capaciteiten tussen de drie aansluitpennen. De onderstaande grafieken geven de grafische weergave van de schakelkarakteristieken bij een zuiver ohmse belasting. Om een en ander duidelijk te maken zijn de verschijnselen in deze grafieken overdreven voorgesteld.
U kunt het volledige in- en uitschakel tijdsinterval t1 tot en met t6 indelen in een aantal karakteristieke Δt's:

- **Interval t1 ~ t2**
  Deze initiële turn-on tijd $t_{d(on)}$ wordt bepaald door de tijd die de gate/source-spanning nodig heeft om te stijgen tot de drempelspanning $U_{GS(th)}$. De tijdconstante van deze actie wordt bepaald door R_S ● C_{gs}. Hierbij staat R_S voor de inwendige impedantie van de bron die de gate van de MOSFET voedt. Natuurlijk speelt de waarde van de weerstand R_{gi} ook een rol. Als u een generator impedantie van 50 Ω in gedachten houdt en een reële waarde van 600 pF voor de C_{gs} invult, is $t_{d(on)}$ ongeveer gelijk aan 11 ns. Noteer dat het dus zeer belangrijk is de impedantie van de aansturende schakeling zo laag mogelijk te maken! Vaak wordt dit vergeten, MOSFET's hebben immers tóch een heel hoge ingangsimpedantie. Dat de bron de C_{gs} moet opladen wordt maar al te vaak over het hoofd gezien.
- **Interval t2 ~ t3**
  De U_{GS} heeft nu de threshold waarde bereikt, met als gevolg dat de MOSFET begint te geleiden. Het gevolg is dat de spanning U_{DS} gaat dalen. In dit tijdsinterval moet C_{dg} ontladen. Uit het equivalent schema blijkt dat dit ontladen via de bron gebeurt. Ook nu is het dus zeer belangrijk de bron een zo laag mogelijke impedantie heeft. Hoe hoger de impedantie van de bron, hoe langer dit interval duurt.
- **Interval t3 ~ t4**
  De MOSFET staat nu in de AAN-modus, de gate/source-spanning zal, afhankelijk van de spanning van de bron, verder gaan stijgen. Deze stijging heeft echter nauwelijks invloed op het gedrag van de halfgeleider. Het heeft dus weinig zin de MOSFET met veel meer dan de drempelspanning aan te sturen.
- **Interval t4 ~ t5**
  De MOSFET moet uitschakelen, de spanning tussen gate en source moet worden verlaagd tot de drempelwaarde. Hoe hoger de stuurspanning die op de gate wordt gezet, hoe langer het duurt voor de U_{GS} is gedaald tot deze drempel.

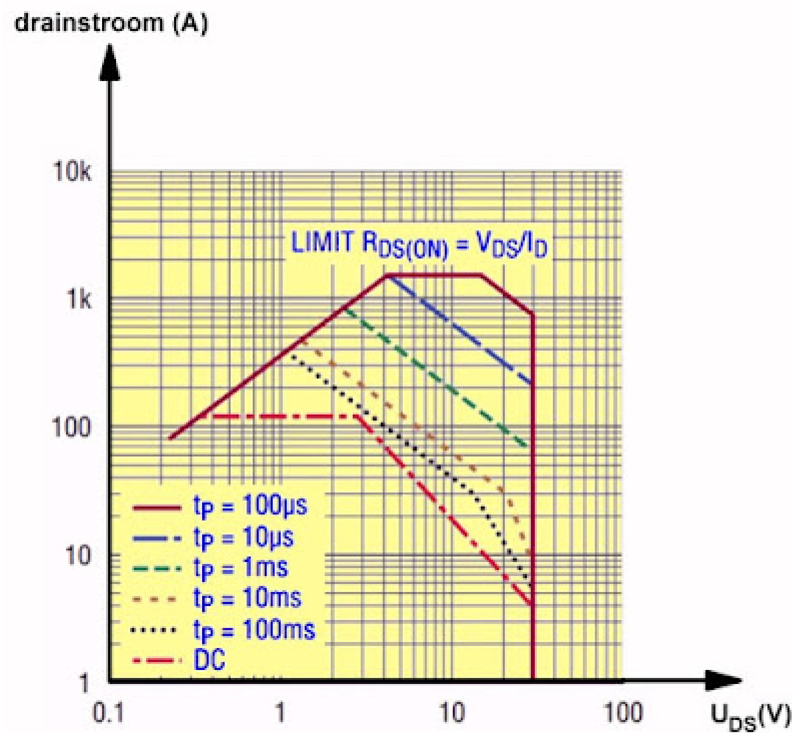
- **Interval t5 ~ t6**
  De spanning op de gate is gedaald tot de threshold waarde, de inwendige weerstand van de MOSFET neemt toe, de stroom I_D begint te dalen en de spanning U_{DS} begint te stijgen. Deze stijging wordt echter vertraagd door het feit dat de parasitaire capaciteit C_{dg} via de impedantie van de bron én de belastingsimpedantie van de MOSFET wordt opgeladen.



De schakelkarakteristieken van de MOSFET. (© 2020 Jos Verstraten)

De threshold spanning
De threshold spanning $U_{GS(th)}$ is de minimale spanning tussen gate en source waarbij drainstroom begint te vloeien. Deze spanningsdrempel kan gemakkelijk worden afgeleid uit de onderste grafiek uit de uitgangskarakteristiek van de MOSFET. De threshold spanning is afhankelijk van de temperatuur en heeft een negatieve temperatuurscoëfficiënt van ongeveer -7 mV/°C.

Safe Area Operation
MOSFET's hebben geen last van second breakdown, een verschijnsel dat bij bipolaire transistoren berucht is. Second breakdown is een catastrofale conditie die bij bipolaire transistoren kan ontstaan door het optreden van zogenaamde thermische hotspot's (*hete vlekken*) in het halfgeleidermateriaal. Hierdoor wijzigt de stroomverdeling waardoor plaatselijk zware overbelasting van en smelt in het halfgeleidermateriaal kan optreden.
Het halfgeleidermateriaal van een MOSFET heeft een positieve temperatuurscoëfficiënt van ongeveer 0,6 %/°C. Als de drainstroom zich, om bepaalde fysisch ingewikkelde redenen, gaat samentrekken in kleine gebieden van het materiaal zullen deze gebieden meer gaan opwarmen dan de rest van het kristal. Hierdoor neemt de temperatuur van de hotspot's toe, de weerstand zal plaatselijk ook stijgen. Het gevolg is dat er een nieuwe stroomverdeling gaat optreden die de stroom langs de hotspot's met hun hoge inwendige weerstand leidt.
Het verschijnsel van het ontstaan van hotspot's herstelt zichzelf en er kan van second breakdown geen sprake zijn.
De safe area van een MOSFET wordt, zoals duidelijk blijkt uit de grafiek van de onderstaande figuur, dus alleen maar bepaald door de thermische begrenzingen van de chip en niet door de grenzen van de second breakdown. Uit deze grafiek volgt dat, hoewel een MOSFET een heel robuust onderdeel is, tóch vernieling kan optreden door buiten de safe area te werken.



De Safe Area Operation grafiek van de MOSFET IRF330.
(© International Rectifier)

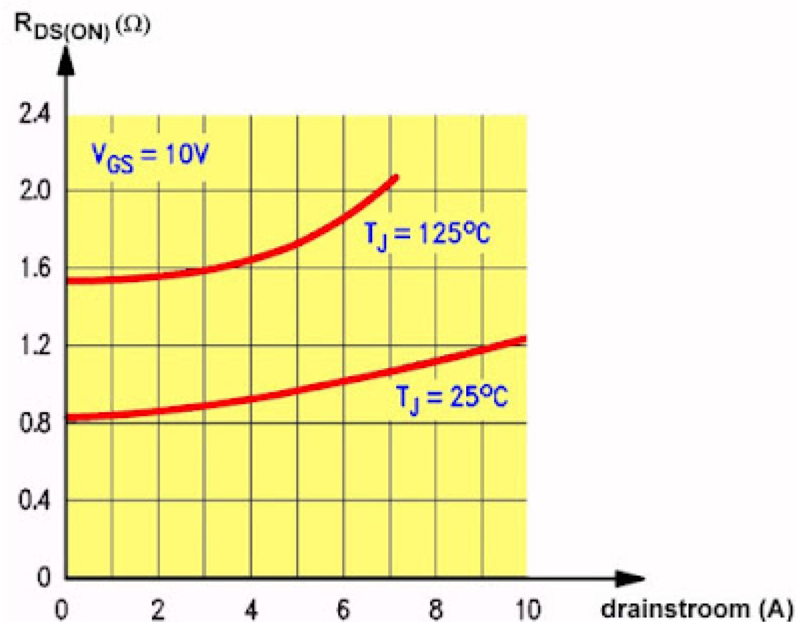
De AAN-weerstand $R_{DS(on)}$
De AAN-weerstand van een MOSFET is een heel belangrijk gegeven, omdat deze weerstand bepaalt hoeveel vermogen er in het onderdeel wordt gedissipeerd. Als u een MOSFET in geleiding stuurt valt de drain/source-spanning terug tot zeer lage waarde en de AAN-weerstand wordt simpelweg gedefinieerd door de wet van Ohm, dus spanning gedeeld door stroom:

$R_{DS(on)} = V_{DS(on)} \;/\; I_D$

Het vermogen dat in de MOSFET wordt gedissipeerd wordt dan uiteraard gegeven door de bekende formule:

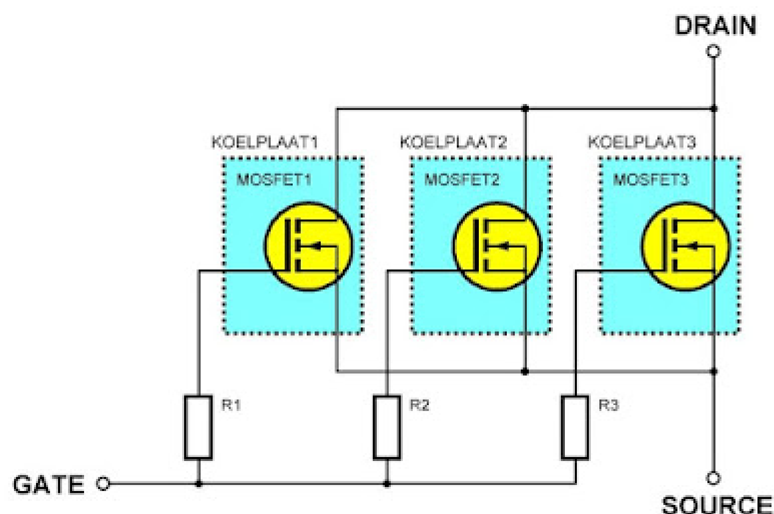
$P = I_D^2 \bullet R_{DS(ON)}$

Om de AAN-weerstand te minimaliseren moet u de gatespanning zo instellen dat de halfgeleider in ieder geval in het lineaire deel van de uitgangskarakteristiek blijft werken. Bij de MOSFET's van de reeks IRFxxx moet u rekening houden met een gatespanning van ongeveer 10 V. Om u een idee te geven van de waarde van de AAN-weerstand is in de onderstaande grafiek deze grootheid uitgezet in functie van de drainstroom voor een IRF330. Merk op dat de inwendige weerstand stijgt als de temperatuur toeneemt, niet verbazingwekkend, immers het materiaal heeft een positieve temperatuurscoëfficiënt.



Het verloop van de AAN-weerstand in functie van de drainstroom.
(© 2020 Jos Verstraten)

Parallel schakelen geen probleem
Het feit dat de AAN-weerstand stijgt als de drainstroom toeneemt heeft een groot voordeel. U kunt diverse MOSFET's parallel schakelen zonder speciale maatregelen te moeten treffen voor een goede stroomverdeling. U weet wellicht dat als u bipolaire transistoren parallel schakelt u kleine weerstanden in de emitters moet opnemen om de stroom evenredig over de parallel geschakelde transistoren te verdelen. Dat kost alweer vermogen dat als warmte wordt afgevoerd.
Bij MOSFET's hoeft dit niet, want als één van de MOSFET's meer stroom zou gaan trekken, dan wordt hij warmer en neemt zijn AAN-weerstand toe, met als gevolg dat de overige MOSFET's meer stroom toegedeeld krijgen. Het systeem zorgt zélf automatisch voor een goede stroomverdeling. Voorwaarde is wél dat u alle parallel geschakelde MOSFET's op individuele koellichamen monteert, zodat zij elkaars temperatuur niet kunnen beïnvloeden.



Parallel schakelen van meerdere identieke MOSFET's is geen probleem.
(© 2020 Jos Verstraten)

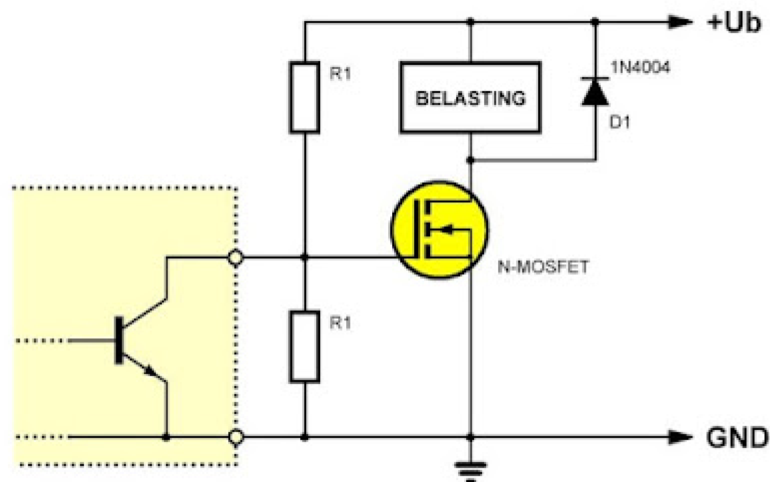
De transconductantie g_{fs}
Een MOSFET is een spanningsgestuurde versterker, net zoals een ouderwetse buis. Vandaar dat voor een MOSFET het ouderwetse begrip *'tranconductantie'* weer actueel wordt. De transconductantie g_{fs} oftewel de geleiding is een grootheid die in Siemens wordt uitgedrukt en gelijk is aan de stroomvariatie gedeeld door de spanningsvariatie. In formulevorm:
$g_{fs} = \Delta I_D / \Delta U_{GS}$

Uit deze formule volgt dat de Siemens gelijk is aan de A/V.
De transconductantie van een MOSFET is afhankelijk van het instellingspunt. De transconductantie is 0 S als de gate/source-spanning kleiner is dan de threshold en stijgt naar een bepaalde eindige waarde als de MOSFET volledig in stroomverzadiging wordt gestuurd. In de meeste gevallen wordt de transconductantie gespecificeerd bij een drain/source-spanning van 20 V en bij een drainstroom van de helft van de maximale waarde. De transconductantie is een belangrijke grootheid bij het ontwerpen van lineaire versterkers, maar heeft geen enkele betekenis bij het ontwerpen van schakelende applicaties.

De MOSFET in de praktijk

De sturing van de gate
De gate van een MOSFET heeft een zeer hoge impedantie en is bijgevolg zeer gevoelig voor statische ladingen. Bovendien is deze gate slechts met een µm-dun laagje siliciumdioxide gescheiden van de rest van de halfgeleider. Zonder beschermde maatregelen zou het simpelweg aanraken van de gate al voldoende zijn om deze dunne laag te laten doorslaan. Gelukkig zijn alle MOSFET's intern voorzien van beveiligingsdioden die het onderdeel veel minder gevoelig maken voor elektrostatische ladingen.
Hoewel het in theorie niet noodzakelijk is een weerstand in serie met de gate op te nemen wordt dit tóch aanbevolen. Deze weerstand zorgt er voor dat er nooit een zo grote stroom door de interne beveiligingsdioden kan lopen dat de MOSFET het loodje legt. Bovendien, vergeet niet dat de gate een zware capacitieve belasting vormt voor de aansturende schakeling. Zonder een stroombegrenzende weerstand in de gate zal er, bij het opeens omschakelen van de stuurspanning van 0 V naar een spanning die hoger is dan de threshold-waarde, heel even een flinke stroom gaan vloeien.

Gate-sturing vanuit open collector IC-uitgangen
De MOSFET wordt spanningsgestuurd en het enige vermogen dat u in de gate moet stoppen wordt bepaald door de energie die noodzakelijk is voor het opladen van de ingangscapaciteit. Een bipolaire vermogenstransistor kunt u nooit rechtstreeks aansturen vanuit een open-collector schakeling. Als de collectorstroom bijvoorbeeld 10 A bedraagt, dan moet u vaak 2 A in de basis sturen en dat kan een open-collector trap uiteraard niet leveren. MOSFET's kunt u evenwel volgens het schema van de onderstaande figuur zonder enig probleem rechtstreeks uit een open-collector uitgang van een IC aansturen. De inschakeltijd wordt hoofdzakelijk bepaald door de waarde van de externe pull-up weerstand R1. Deze weerstand vervult de functie van serieweerstand waar wij het in de vorige paragraaf over hadden. Hoe kleiner deze weerstand, hoe sneller de MOSFET zal schakelen. De waarde van de weerstand wordt echter begrensd door de maximale stroom die u in de open-collector uitgang mag sturen.
Uiteraard moet u er ook bij een MOSFET voor zorgen dat de spanning op de drain nooit veel hoger dan de voedingsspanning kan worden. Dat is zeer belangrijk als u inductieve belastingen zoals relais en motoren gaat schakelen. De diode D1 zorgt ervoor dat een te hoge inductieve spanning op de drain onmiddellijk wordt afgeleid naar de $+U_b$.

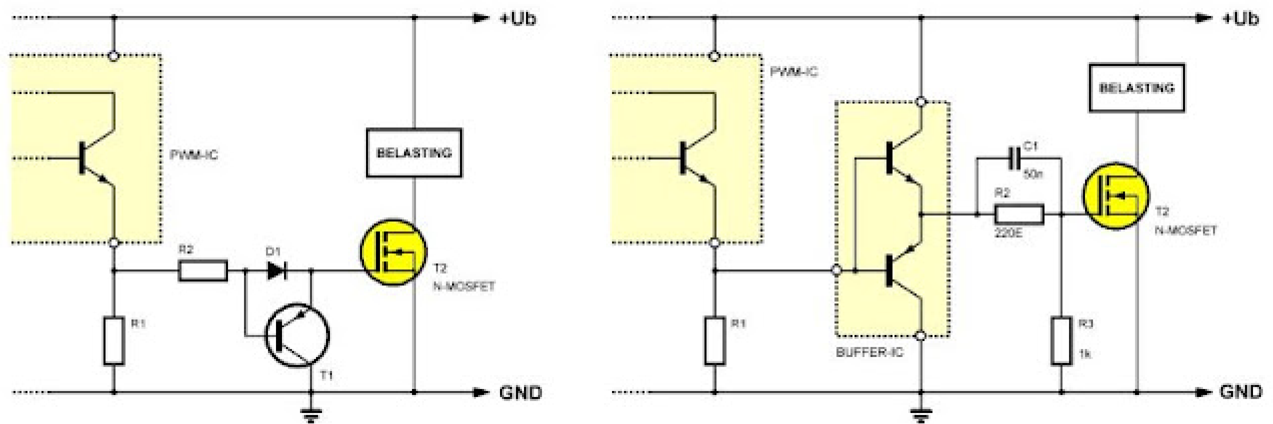


Het aansturen van een N-kanaal MOSFET uit een open-collector uitgang.
(© 2020 Jos Verstraten)

Sturen van een MOSFET uit standaard TTL IC's
Als u een MOSFET uit standaard 5 V TTL-iC aanstuurt, is het essentieel dat u een open-collector buffer tussen schakelt. De 'H'-spanning van 2,4 V die in het slechtste geval door een TTL-schakeling wordt geleverd is immers niet hoog genoeg om de threshold spanning van de gate met een paar volt te overstijgen. U moet dan de open-collector buffer van het vorige schema voeden uit een spanning van minstens 10 V.

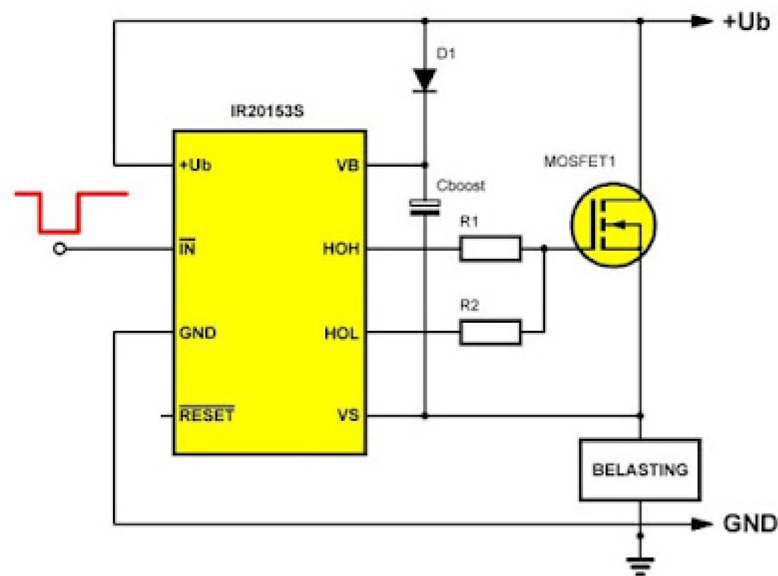
Sturen van een MOSFET uit standaard CMOS IC's
Bij het sturen van een MOSFET uit CMOS-schakelingen doen zich geen problemen voor, onder de voorwaarde dat u deze schakelingen uit meer dan 5 V voedt. Bij een voedingsspanning van 15 V stelt u zeker dat de hoge uitgang zonder meer groter is dan de threshold spanning van de MOSFET.

Aansturen uit PWM-schakelingen
In de vermogenselektronica wordt steeds meer gebruik gemaakt van PWM, *'**P**ulse **W**ide **M**odulation'*. Iedere schakelende voeding en een heleboel DC-vermogensregelingen werken volgens dit principe. De combinatie van een dergelijk IC en een MOSFET als vermogensschakelaar is een ideale combinatie. Echter, de meeste PWM-IC's hebben een NPN-transistor in de eindtrap. Deze transistor is AAN op het moment dat de MOSFET ook naar AAN moet worden gestuurd. In de onderstaande figuur zijn twee typische schakelingen weergegeven, waarmee u uit deze eindtransistor de gate van een MOSFET kunt aansturen.
In de rechter schakeling wordt gebruik gemaakt van een condensator van 50 nF over de serieweerstand. Deze condensator zorgt voor een zeer korte schakeltijd van de MOSFET, maar moet wél heel snel opgeladen kunnen worden. De NPN-transistor in de uitgang van het PWM-IC is niet in staat voldoende stroom te leveren. Vandaar dat een speciale symmetrische buffer wordt tussen geschakeld die wordt gekenmerkt door een zeer lage inwendige weerstand. Deze buffer is wél in staat de noodzakelijke grote piekstroom te leveren voor het snel opladen van de condensator.
In het linker schema wordt een PNP-transistor gebruikt om de in de gate opgeslagen lading snel naar de massa te laten afvloeien als de MOSFET naar sper moet gaan.



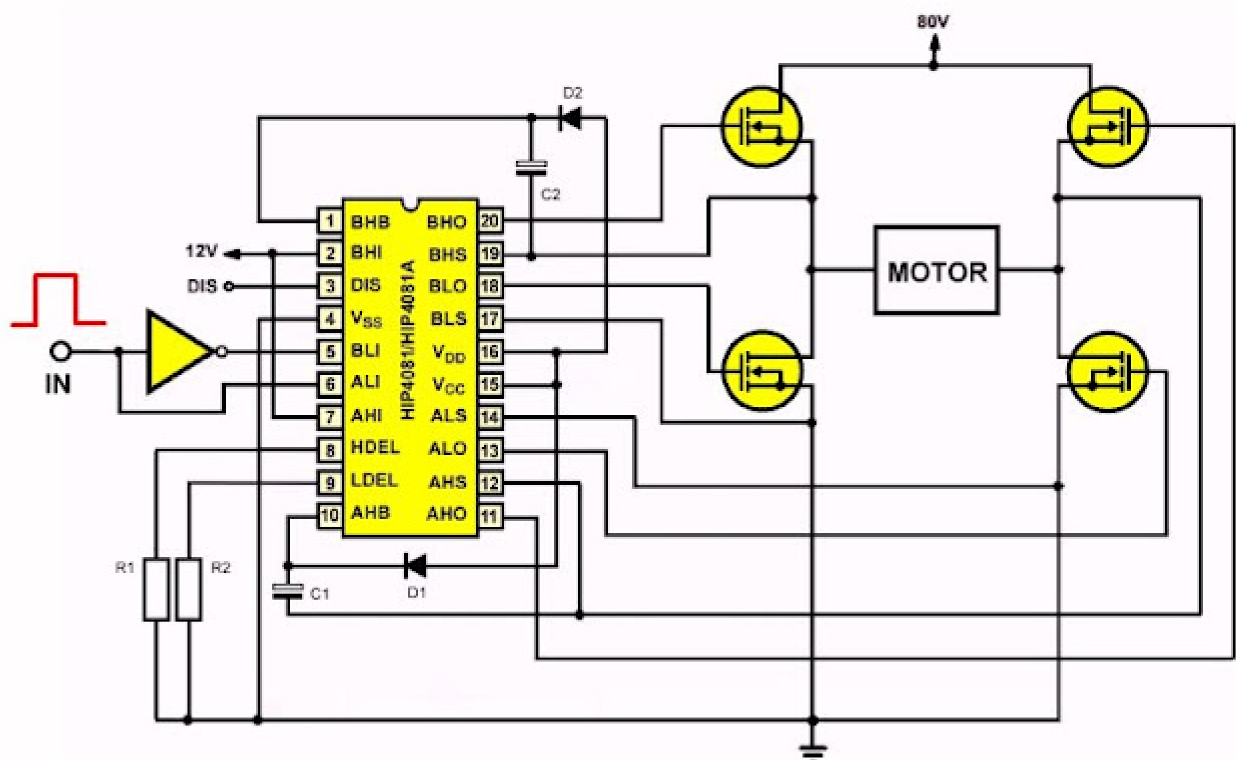
Twee methodes om een MOSFET aan te sturen vanuit de uitgangstrap van een standaard PWM-IC.
(© 2020 Jos Verstraten)

High side belastingen schakelen met N-MOSFET's
De tot nu toe behandelde schakelingen werken met een belasting die met één elektrode aan de positieve voeding hangt en waarvan de tweede elektrode door de geleidende MOSFET naar de massa wordt getrokken. N-kanaal enhanced mode MOSFET's zijn uiteraard uitstekend geschikt voor het schakelen van dergelijke belastingen.
Er ontstaat een probleem als u een zogenaamde *'high side'* belasting moet schakelen. Een dergelijke belasting hangt met één elektrode aan de massa. Om de belasting in te schakelen moet u de tweede elektrode met de positieve voeding verbinden. Dat kan niet zonder meer met de goedkope N-kanaal enhanced mode MOSFET's.
U kunt dit probleem uiteraard oplossen door een veel duurdere P-MOSFET toe te passen. Diverse bedrijven hebben echter speciale IC's ontwikkeld, zogenaamde *'high side drivers'*, waarmee u dergelijke belastingen tóch met goedkope N-MOSFET's kunt aan- en uitschakelen. In de onderstaande figuur is het schema getekend rond de high side driver IR20153S van International Rectifier. Deze chip kost ongeveer € 2,00 en is goed leverbaar.
Dergelijke driver-IC's werken volgens het boost-principe, waarbij een externe condensator wordt opgeladen tot de voedingsspanning. Deze extra spanning wordt in serie gezet met de belasting van de schakeling, waardoor het mogelijk wordt de spanning tussen de gate en de source tóch tot boven de threshold spanning op te voeren en de MOSFET dus naar geleiding te sturen.
De beperking van dit systeem is dat de geleidende fase van de MOSFET maar een beperkte tijd kan duren. De spanning over de boost-condensator gaat immers langzaam dalen waardoor het spanningsverschil tussen gate en source weer onder de threshold waarde daalt.
Voor het aansturen van high side belastingen met PWM-schakelingen is een dergelijke oplossing echter ideaal.



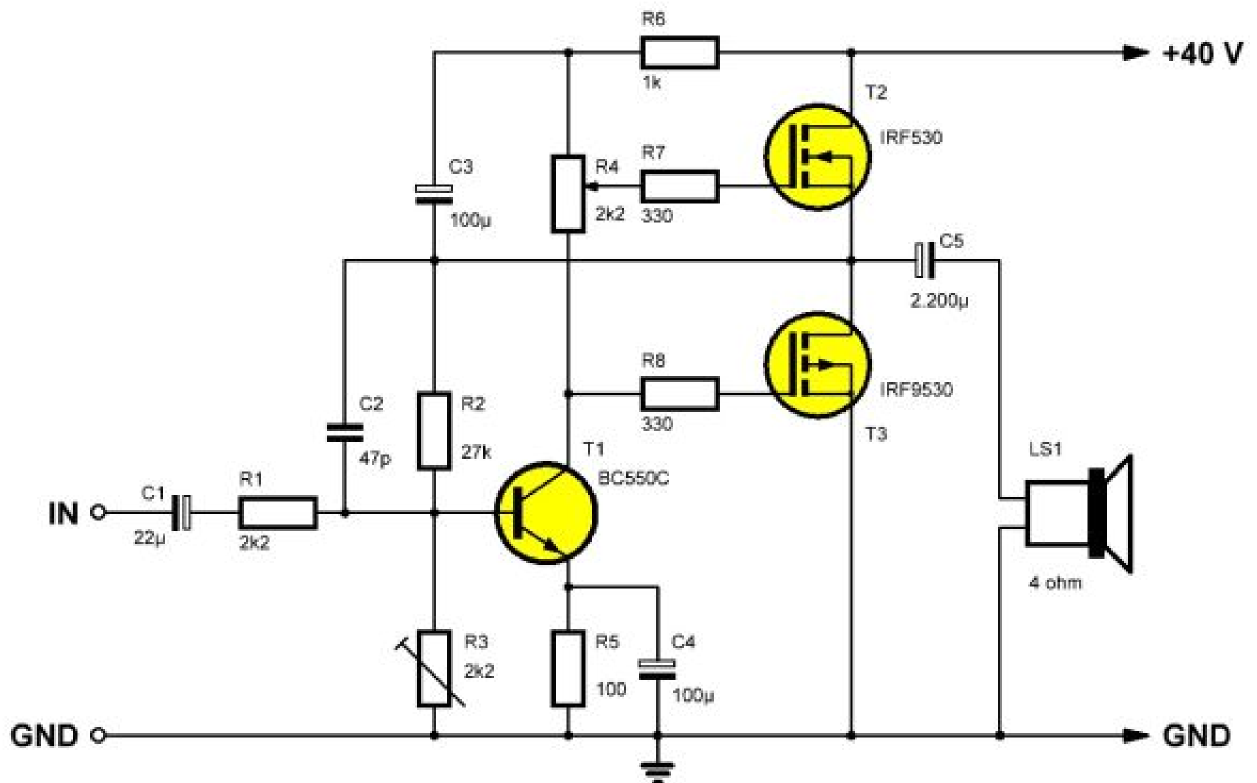
Het gebruik van een N-MOSFET voor het aansturen van een high side belasting. (© 2020 Jos Verstraten)

De MOSFET als besturing van H-bruggen
Als u gelijkspanningsmotoren moet besturen in snelheid én in draairichting kunt u gebruik maken van een H-brug, die door een puls waarvan u de duty-cycle kunt regelen wordt aangestuurd .
Het zal duidelijk zijn dat N-MOSFET's ideale onderdelen zijn voor het samenstellen van zo'n brug. De uiterst lage AAN-weerstand van dergelijke transistoren zorgt voor weinig vermogensverlies en voor weinig extra koeloppervlak. Als u echter zo'n brug wilt uitvoeren met vier stuks N-MOSFET's zit u weer met het probleem dat twee van die transistoren een high side belasting moeten sturen en twee een low side belasting. Gelukkig zijn ook hiervoor complete driver-IC's ontwikkeld, zoals de HIP4081A van Renesas die u voor ongeveer € 5,00 kunt aanschaffen en bruikbaar is voor voedingsspanningen tot +15 V. Het door de fabrikant voorgeschreven schema is getekend in de onderstaande figuur.



Vier N-MOSFET's vormen een H-brug voor het aansturen van een DC-motor. (© 2020 Jos Verstraten)

MOSFET's en audioversterkers
Zoals uit de besproken uitgangskarakterstieken blijkt, hebben MOSFET's een lineair gebied. Het zal dan wel geen verbazing wekken dat u MOSFET's uitstekend kunt gebruiken in analoge audio eindversterkers. Natuurlijk hebt u daar geen profijt van de extreem lage AAN-weerstand, maar sommige ontwerpers vinden het geluid van MOSFET-eindtrappen veel beter klinken dan eindtrappen samengesteld met complementaire bipolaire transistoren. Heimwee naar het buizen tijdperk?
In de onderstaande figuur hebben wij, als afsluiting van dit hoofdstuk, het basisschema gegeven van een eenvoudige audio eindversterker met een maximaal vermogen van 18 W in 4 Ω. In een dergelijke schakeling moet u wél zowel een N-kanaal als een P-kanaal MOSFET toepassen, waarbij het er aan komt typen te kiezen die zoveel mogelijk vergelijkbare karakteristieken hebben.



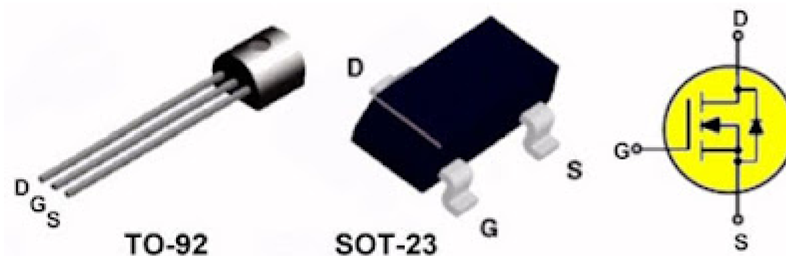
Een eenvoudige MOSFET eindversterker voor audio. (© 2020 Jos Verstraten)

Goedkope MOSFET's om mee te experimenteren

Inleiding
Vrijwel alle halfgeleider fabrikanten brengen een uitgebreid assortiment MOSFET's op de markt. In de onderstaande paragraafjes laten wij u kennis maken maar een paar zeer universele en goedkope typen die u in huis kunt halen voor het experimenteren met deze veelzijdige halfgeleiders. De genoemde prijzen zijn uiteraard richtprijzen met als datum februari 2020 en wij hebben via Google gezocht naar de laagste prijzen die wij konden vinden.

De 2N7000 N-kanaal enhanced mode MOSFET
De 2N7000 is een laagvermogen MOSFET van Fairchild in TO-92 en SOT-23 behuizing die u al voor ongeveer € 0,07 stukprijs kunt kopen en die 400 mA stroom kan verwerken. De aansluitgegevens zijn voorgesteld in de onderstaande figuur.
De specificaties in het kort:
- **Fabrikant:** Fairchild
- **Stukprijs per tien gekocht:** € 0,07
- **Behuizing:** TO-92, SOT-23

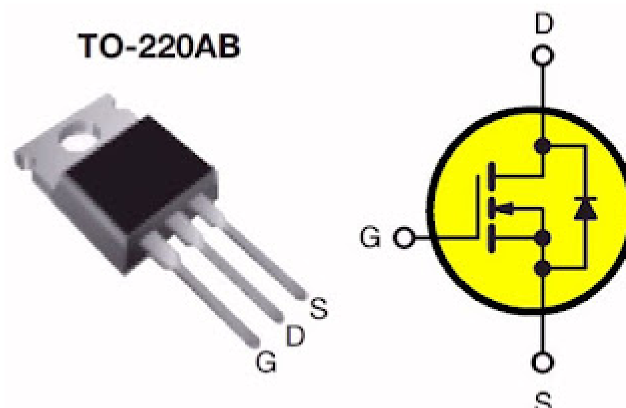
- **Drain/source-spanning:** 60 V max.
- **Gate/source-spanning:** ±20 V max.
- **Drainstroom continu:** 200 mA max.
- **Drainstroom puls:** 2 A max.
- **Gate threshold spanning:** 0,8 V ~ 3,0 V
- **$R_{DS(ON)}$ bij 200 mA:** 1,2 Ω ~ 5,0 Ω
- **Ingangscapaciteit:** 20 pF ~ 50 pF
- **Transconductantie:** 100 mS ~ 320 mS
- **Turn-on tijd:** 10 ns typisch
- **Turn-off tijd:** 10 ns typisch



Behuizingen en aansluitgegevens van de 2N7000. (© Fairchild)

De IRFZ44N N-kanaal enhanced mode MOSFET
Deze transistor van International Rectifier is uitgevoerd in Advanced HEXFET technologie, zit in een TO-220AB behuizing en kost u ongeveer € 0,72. De aansluitgegevens zijn voorgesteld in de onderstaande figuur.
De specificaties in het kort:

- **Fabrikant:** International Rectifier
- **Stukprijs per vijf gekocht:** € 0,72
- **Behuizing:** TO-220AB
- **Drain/source-spanning:** 55 V max.
- **Gate/source-spanning:** ±20 V max.
- **Drainstroom continu:** 35 A max.
- **Drainstroom puls:** 160 A max.
- **Gate threshold spanning:** 2,0 V ~ 4,0 V
- **$R_{DS(ON)}$ bij 25 A:** 17,5 mΩ max.
- **Ingangscapaciteit:** 1.470 pF
- **Transconductantie:** 19 S min.
- **Turn-on tijd:** 12 ns
- **Turn-off tijd:** 44 ns



Behuizing en aansluitgegevens van de IRFZ44N en IRF3205. (© Fairchild)

De IRF3205 N-kanaal enhanced mode MOSFET
Ook deze 110 ampère halfgeleider van International Rectifier zit in een TO-220AB behuizing, kost ongeveer € 0,41 per stuk en heeft een zeer lage $R_{DS(ON)}$ van slechts 8,0 mΩ. De aansluitgegevens zijn identiek als deze van de IRFZ44N.
De specificaties in het kort:

- **Fabrikant:** International Rectifier
- **Stukprijs per tien gekocht:** € 0,41
- **Behuizing:** TO-220AB
- **Drain/source-spanning:** 55 V max.
- **Gate/source-spanning:** ±20 Vmax.
- **Drainstroom continu:** 110 A max.
- **Drainstroom puls:** 390 A max.
- **Gate threshold spanning:** 2,0 V ~ 4,0 V
- **$R_{DS(ON)}$ bij 62 A:** 8,0 mΩ max.
- **Ingangscapaciteit:** 3.247 pF typisch
- **Transconductantie:** 44 S min.
- **Turn-on tijd:** 14 ns max.
- **Turn-off tijd:** 50 ns max.